

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ФОСФОРА НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

А. С. Кукушкин^{1)*}, *А. В. Пархоменко*²⁾

¹⁾ Морской гидрофизический институт РАН,
Россия, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2; **kukushkinas@mail.ru*

²⁾ Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН,
Россия, 299011, Севастополь, пр. Нахимова, 2

Резюме. По данным многолетних наблюдений рассмотрены особенности сезонной изменчивости пространственного и вертикального распределения малоизученного компонента взвешенного органического вещества – взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$) в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза в северо-западной части Черного моря. Рассчитаны статистические оценки сезонного изменения одновременно измеренных концентраций взвешенного органического углерода, азота, фосфора и хлорофилла «а» и их отношений в исследуемых районах, различающихся по степени влияния речного стока и вод открытого моря. В поверхностном слое моря установлено сопоставимое распределение измеренных и рассчитанных (по спутниковым наблюдениям и измеренным концентрациям хлорофилла «а») величин $P_{\text{ВОВ}}$. Получено, что в западном районе шельфа (районе постоянного влияния речного стока) максимальные величины содержания $P_{\text{ВОВ}}$ отмечались в весенний период, а в центральном районе в летне-осенний период, когда в район поступали трансформированные речные воды, обогащенные биогенными элементами. Согласованность внутригодовых изменений содержания $P_{\text{ВОВ}}$ и структурных показателей фитопланктона (биомасса и концентрация хлорофилла «а») указывает на роль фитопланктона в образовании $P_{\text{ВОВ}}$ и его сезонной изменчивости. Установлено, что межгодовая сезонная изменчивость $P_{\text{ВОВ}}$ зависит от изменчивости объема речного стока, масштабов его распространения на северо-западном шельфе и региональных гидрометеорологических условий.

Ключевые слова. Черное море, распределение, изменчивость, взвешенный органический фосфор, хлорофилл «а», речной сток, гидрометеорологические условия.

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF SUSPENDED ORGANIC PHOSPHORUS IN THE NORTH-WESTERN SHELF OF THE BLACK SEA

A.S. Kukushkin^{1)*}, *A.V. Parkhomenko*²⁾

¹⁾ Marine Hydrophysical Institute RAS,
2, Kapitanskaya str., 299011, Sevastopol, Russia; **kukushkinas@mail.ru*

²⁾ Kovalevsky Institute of Marine Biological Studies RAS,
2, Nakhimov ave., 299011, Sevastopol, Russia

Summary. According to the data of long-term observations, the features of the seasonal variability of the spatial and vertical distribution of a poorly studied

component of suspended organic matter - suspended organic phosphorus (P_{SOM}) in the surface layer and in the zone of photosynthesis in the northwestern part of the Black Sea are considered. Statistical estimates of seasonal changes in simultaneously measured concentrations of suspended organic carbon, nitrogen, phosphorus and chlorophyll *a* and their ratios in the study areas differing in the degree of influence of river runoff and water of open part sea are calculated. In the surface layer of the sea, a comparable distribution of the values of P_{SOM} measured and calculated (from satellite observations and measured concentrations of chlorophyll *a*) is established. It was obtained that in the western region of the shelf (the area of constant influence of river flow) the maximum values of the P_{SOM} content were recorded in the spring period and in the central region in the summer-autumn period, when the transformed river waters enriched with nutrients come. The consistency of the intra-annual changes in the content of P_{SOM} and the structural indexes of phytoplankton (biomass and chlorophyll *a* concentration) indicates the role of phytoplankton in the formation of P_{SOM} and its seasonal variability. It is established that the interannual seasonal variability of the P_{SOM} depends on the volatility of the river runoff volume, the extent of its distribution on the northwestern shelf and regional hydrometeorological conditions.

Keywords. The Black Sea, distribution, variability, suspended organic phosphorus, chlorophyll «a», river flow, hydrometeorological conditions.

Введение

Исследования состава и пространственно-временной изменчивости содержания отдельных компонентов взвешенного органического вещества (ВОВ) в значительной степени определяют продуктивность морской экосистемы, интенсивность протекания в ней биохимических процессов и устойчивость к воздействиям на нее различных природных и антропогенных факторов.

Такие исследования приобретают особое значение в северо-западной части Черного моря (СЗЧМ), являющейся важным районом рекреации, рыболовства и воспроизводства рыбных запасов. СЗЧМ отличается от других районов моря высокой антропогенной нагрузкой, связанной с загрязнением ее береговыми стоками (речные и промышленно-бытовые стоки, смыв удобрений с полей и др.), интенсивным судоходством, разведкой и добычей нефти и газа. В наибольшей степени постоянному антропогенному прессу подвержена зона вдоль северного и западного побережий, где происходит смешение речных вод Дуная, Днестра, Днепра и Южного Буга и промышленно-бытовых стоков из расположенных на этом побережье многочисленных населенных пунктов с морской водой шельфа. В результате в трансформированных водах прибрежной зоны увеличивается содержание биогенных элементов (азота и фосфора), азот и фосфорсодержащих органических соединений и взвешенного вещества аллохтонного происхождения (Гаркавая, Богатова, 2006; Гидрометеорология и гидрохимия..., 1992), что активизирует развитие фито- и бактериопланктона и, как следствие, способствует увеличению содержания отдельных компонентов ВОВ. Центральный район СЗЧМ в меньшей степени

подвержен антропогенному влиянию, поскольку это влияние связано с сезонным поступлением в район загрязненных трансформированных речных вод и масштабом их распространения на шельфе, отличающееся значительной межгодовой изменчивостью. Так, в период половодья (май – август) и при благоприятной ветровой ситуации (юго-западный и западный ветер) эти воды поступают в центральный район (Большаков, 1970), что приводит к увеличению биогенных элементов, азот- и фосфорсодержащих органических и взвеси в верхнем перемешанном слое. Как следствие, в этом слое активизируется фотосинтез планктонных водорослей, повышается содержание кислорода в среде и снижается прозрачность воды с последующим возможным возникновением зон с дефицитом кислорода в придонном слое (Берлинский и др., 2003; Пархоменко, Ковальчук, 1993).

В 80-е – 90-е годы XX столетия в СЗЧМ достаточно активно проводились исследования по содержанию взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$) и азота ($N_{\text{ВОВ}}$) (Бурлакова и др., 1988, 1998; Востоков, 1987, 1996; Кукушкин и др., 2004, 2006, 2008; Кукушкин, 2013а). В то же время измерения содержания взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$) носили эпизодический характер, что не позволяло получить представление об его пространственно-временной изменчивости в этой части моря (Бурлакова и др., 1988). Для пополнения массива данных по содержанию $P_{\text{ВОВ}}$ (в годы их отсутствия) нами был предложен и опробован метод его расчета, основанный на использовании корреляционной связи между одновременно измеренными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» (Кукушкин, 2013б; Кукушкин, Пархоменко, 2015).

Цель настоящей работы состояла в изучении пространственного и вертикального распределения содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в различные сезоны, внутригодовой и сезонной межгодовой его изменчивости в различных районах СЗЧМ, а также в оценке влияния природных факторов на эту изменчивость.

Материалы и методы

В работе использовались следующие данные:

– из банка данных Морского гидрофизического института РАН и отдела экологической физиологии водорослей Института морских биологических исследований им А. О. Ковалевского РАН экспериментальные данные по содержанию $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» ($C_{\text{ХЛ}}$) полученные в СЗЧМ с 1979 по 1995 гг. в 33 научных рейсах на 266 станциях и 931 горизонте. Из них, одновременные измерения этих показателей были проведены в период с 1985 по 1994 гг. в 8 рейсах на 65 станциях и 252 горизонтах. Также использовались значения солености воды в поверхностном слое СЗЧМ (около 55 тысяч измерений в 1947-2010 гг.) и температуре воздуха с 1978 по 2010 гг.;

– среднемесячные данные об объеме расхода стока Дуная с 1950 по 2010 гг. (Воскресенская и др., 2011);

– многолетние данные по биомассе фитопланктона за период 1948-2001 гг. (Кривенко, Пархоменко, 2010; Black Sea Data..., 2003).

Кроме того, была использована дополнительная информация по содержанию хлорофилла «а» в поверхностном слое моря, полученная по результатам спутниковых наблюдений радиометра CZCS в период 1978-1986 гг. (данные любезно предоставлены Суслиным В. В.) и сканера цвета Sea WiFS в течение 1998-2010 гг. (Blackseacolor.com).

Методика определения содержания компонентов ВОВ подробно описана в работах (Бурлакова и др., 1988, 1998). Содержание $P_{\text{ВОВ}}$ определялось сжиганием взвеси на стекловолоконистых фильтрах GF/F в плаве кислых солей (Люцарев, Миркина, 1978), концентрация хлорофилла «а» – флюориметрическим методом. Сравнение одновременно измеренных среднемесячных величин концентрации хлорофилла «а», полученных по судовым и спутниковым (сканеры CZCS и Sea WiFS) наблюдениям в одних и тех же районах моря, показало их удовлетворительное сходство (различие составило 10-25%).

Для пополнения массива данных по содержанию $P_{\text{ВОВ}}$ (в годы их отсутствия) использовался расчетный метод, основанный на корреляционных связях между одновременно измеренными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» (Кукушкин, 2013б; Кукушкин, Пархоменко, 2015). Уравнения регрессии рассчитывали по экспериментальным данным этих параметров в годы и сезоны, когда отсутствовали аномальные изменения их концентраций. Степень связи между переменными в линейных уравнениях регрессии вида $y = ax + b$, где, $y - P_{\text{ВОВ}}$, $x - C_{\text{ХЛ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, оценивали по коэффициенту корреляции (r), его достоверности (p) и стандартной ошибке регрессии (σ) (Румшинский, 1970) (табл. 1). Значения коэффициентов корреляции r (0.61 – 0.96) для приведенных зависимостей оказались достоверными при высоком уровне значимости ($p < 0.001$).

Таблица 1. Параметры уравнений регрессии ($y = ax + b$), связывающие концентрацию взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$), с концентрацией хлорофилла «а» ($C_{\text{ХЛ}}$) и взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$) в поверхностном слое (ПС) и в слое фотосинтеза (ФС) в северо-западной части Черного моря

	Зима		Весна		Лето		Осень	
	ПС	ФС	ПС	ФС	ПС	ФС	ПС	ФС
$P_{\text{ВОВ}} = aC_{\text{ХЛ}} + b$								
a	0.023	0.02	0.079	0.069	0.086	0.08	0.096	0.08
b	0.01	0.0165	0.016	0.02	0.049	0.01	0.023	0.009
r	0.96	0.74	0.8	0.61	0.91	0.86	0.92	0.8
s	0.009	0.018	0.035	0.026	0.045	0.025	0.04	0.015
N	12	129	76	122	28	47	47	47
$P_{\text{ВОВ}} = aC_{\text{ВОВ}} + b$								
a	0.0044	0.00362	0.0054	0.00495	0.0045	0.0028	0.023	0.003
b	-0.0087	0.007	-0.0097	0.0012	-0.014	0.013	0.0084	0.012
r	0.93	0.77	0.94	0.83	0.92	0.83	0.63	0.81
s	0.012	0.017	0.02	0.02	0.039	0.013	0.007	0.013
N	11	181	76	242	28	91	33	115

В качестве индикатора трансформации ВОВ использовали атомарные отношения $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ [Романкевич, 1970; Corin-Montegut C., Corin-Montegut G., 1983; Hobson et al., 1973). Соотношение детритной и фитопланктонной фракций в ВОВ оценивали по отношению концентраций $C_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» (далее С/хл«а») (Hobson et al., 1973).

Результаты и обсуждение

Исследования пространственного и вертикального распределения $P_{\text{ВОВ}}$, внутрigoдовой и сезонной межгодовой его изменчивости проводили в западном и центральном районах СЗЧМ, которые в разной степени подвержены влиянию стока рек и вод открытого моря (рис. 1). Распространение и трансформация речных вод, всесторонне исследованные в работе (Большаков, 1970), происходят в трех пространственных зонах: основной, гидрофронтальной и заключительной. Границами этих зон приняты изохалины 10, 12 и 17 psu. Положение и формы границ имеют значительную пространственно-временную изменчивость, зависящую от объема стока рек и ветровых условий, определяющих динамику окружающих вод.

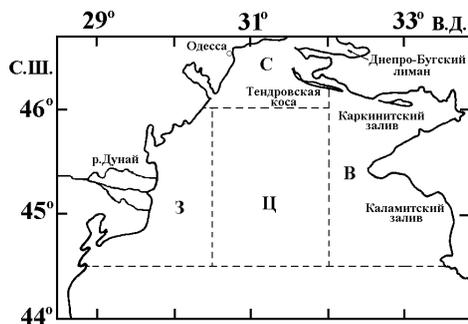


Рисунок 1. Районы северо-западной части Черного моря: западный (З), северный (С), центральный (Ц), восточный (В)

Сезонная изменчивость пространственного и вертикального распределения содержания $P_{\text{ВОВ}}$. В зимний период, когда объем речного стока по сравнению с весенне-летним периодом резко снижался, в береговой зоне выделялась сравнительно узкая по ширине (35-55 км) зона трансформации речных вод (рис. 2а). Немногочисленные измерения $P_{\text{ВОВ}}$ в декабре 1987 – январе 1988 г. показали, что в поверхностном слое его содержание на большей части СЗЧМ было пониженным (0.02-0.03 мкМ). В предустьевых районах Дуная и Днепро-Бугского лимана (западный и северный районы СЗЧМ) оно было примерно одинаковым и относительно небольшим (0.03-0.05 мкМ) (рис. 2а, табл. 2). Отметим хорошее совпадение распределений измеренных и рассчитанных (по данным спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла «а» с помощью радиометра CZCS за 1978-1986 гг.) концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ (рис. 2а, 2б), что подтверждает возможность совместного их использования. Пространственные распределения $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и зоне фотосинтеза хорошо совпадали.

Анализ величин атомарных отношений C/N и C/P показал, что в районе постоянного влияния речного стока (северный и западный районы СЗЧМ) в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза они были примерно одинаковы (106:14:0.38) (табл. 2), но заметно выше их оптимального («редфилдского») соотношения (106:16:1). Полученные в этих слоях величины отношений $C/\text{хл}«а»$, равные 118-123, и C/N (7.6), а также средние значения биомассы фитопланктона, рассчитанные по концентрации хлорофилла «а» на сухую массу $C_{\text{ХЛ}} \times 50$ (Бурлакова и др., 1998), которые в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза составляли 76.5 и 67.5 мгСм^{-3} , а их доли от содержания $S_{\text{ВОВ}}$ – 52 и 57% соответственно, указывают на то, что вклад фитопланктона и детрита в ВОВ был примерно одинаков.

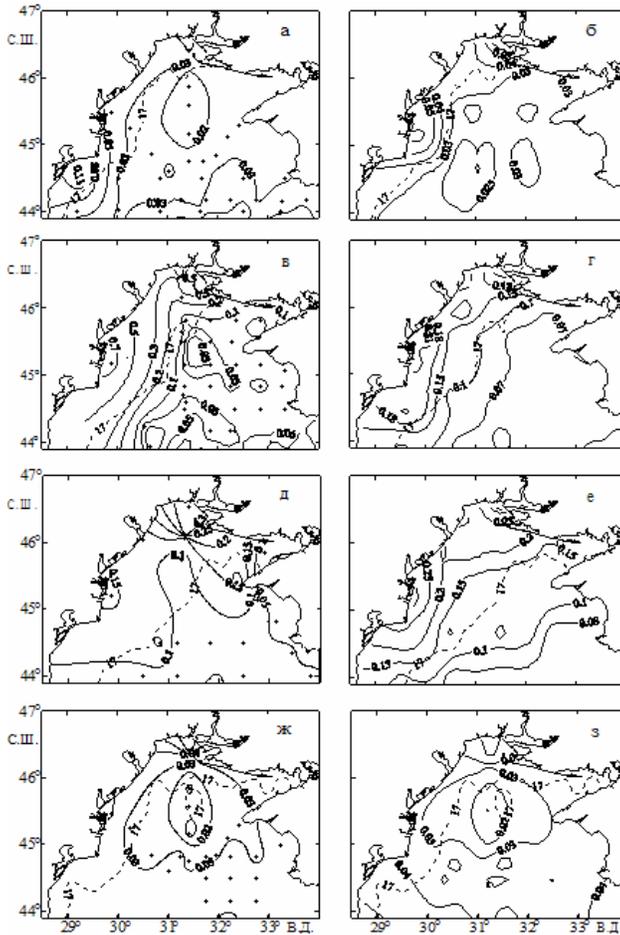


Рисунок 2. Распределение измеренных (а, в, д, ж) и рассчитанных (б, г, е, з) концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $\mu\text{М}$ в поверхностном слое моря в зимний – (а, б), весенний – (в, г), летний – (д, е) и осенний – (ж, з) периоды.
Штриховая линия – изохалина 17 psu. Точки – станции

В центральном районе СЗЧМ, где в зимний период влияние речного стока на воды этого района практически не сказывается (Большаков, 1970), средние величины атомарных отношений C/N и C/P в поверхностном слое и в зоне

фотосинтеза составляли 106:13.6:0.34 и 106:12.4:0.32 соответственно, а отношения С/хл«а» (140-147) в этих слоях были выше по сравнению с западным и северным районом (рис. 2а, табл. 2). Кроме того, более чем в 2 раза было ниже и рассчитанное для обоих слоев значение биомассы фитопланктона, равное 33.5 мгСм^{-3} . Доля фитопланктона в $C_{\text{ВОВ}}$ изменялась в интервале 34-36%, что указывало на более высокое содержание детритной фракции в ВОВ по сравнению с западным районом. Относительно высокие значения отношений С/Р и N/P в районах исследований, видимо, объясняются более быстрым выведением фосфора из детрита (Рудяков и др., 1984).

Таблица 2. Сезонные изменения одновременно измеренных концентраций компонентов ВОВ в поверхностном слое (ПС) и в зоне фотосинтеза (ФС) в различных районах СЗЧМ

Се-зон	Слой	N/n	$C_{\text{ВОВ}}$ мкМ	$N_{\text{ВОВ}}$ мкМ	$P_{\text{ВОВ}}10^{-2}$, мкМ	$C_{\text{ХЛ}}$ мгм ⁻³	C:N:P	C/ хл«а»
Западный район								
Зима	ПС	9	12.4±6.9	1.64±1,05	4.5±3,4	1.53±0.62	106:14:0.38	118±57
	ФС	8/28	9.8±3.3	1.3±0,49	3.4±1.1	1.35±0.92	106:14:0.37	123±47
Весна	ПС	6	81.3±116.9	13.74±18.75	40.0±56.0	0.87±0.8	106:17.9:0.52	628±426
	ФС	4/22	58.3±73.6	10.0±11.0	29.0±33.0	0.7±0.33	106:18.2:0.53	378±208
Лето	ПС	4	64.0±25.0	9.93±2.58	24.0±11.7	2.04±1.28	106:16.4:0.4	375±154
	ФС	4/13	55.5±15.1	9.18±4.03	22.6±8.6	2.91±1.36	106:17.5:0.43	229±74
Осень	ПС	2	10.0±2.0	1.7±0.7	3.8±1.5	1.25±0.1	106: 18:0.4	100±29
	ФС	2/4	9.4±1.7	1.4±0.2	3.0±0.8	1.34±0.02	106:15.2:0.34	85±17
Центральный район								
Зима	ПС	13	7.8±2.2	1.0±0.41	2.5±0.7	0.67±0.19	106:13.6:0.34	140±68
	ФС	9/59	8.2±2.6	0.96±0.3	2.5±0.6	0.67±0.18	106:12.4:0.32	147±51
Весна	ПС	12	13.3±5.9	1.87±0.77	5.2±2.6	0.51±0.39	106:14.9:0.4	313±219
	ФС	12/90	9.4±3.4	1.46±0.61	3.9±1.4	0.59±0.32	106:16.5:0.44	191±162
Лето	ПС	5	19.4±3.9	3.41±1.28	7.4±1.7	0.42±0.32	106:18.6:0.4	554±351
	ФС	5/22	22.6±8.4	3.37±1.43	8.1±3.0	0.49±0.14	106:15.8:0.38	553±207
Осень	ПС	5	11.0±2.6	1.62±0.36	3.1±0.5	0.27±0.09	106:15.6:0.3	489±235
	ФС	2/15	12.9	1.87	4.4	0.25±0.05	106:15.4:0.36	619±55

Примечание. N – количество экспедиционных рейсов, n – количество станций

В весенний период повышенное содержание $P_{\text{ВОВ}}$, как и в зимний период, наблюдалось в трансформированных речных водах, распространяющихся вдоль северного и западного берегов (рис. 2в, 2г). Их прозрачность была равна 3-6 м, а соленость находилась в пределах 8.5-16.5 psu (Кукушкин и др., 2004). В связи с половодьем площадь зоны смешивания речных и морских вод возрастала, а ее граница перемещалась в центральный район. По сравнению с

зимним периодом содержание $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза увеличилось в 8-10 раз (табл. 2), а $C_{\text{ВОВ}}$ и $N_{\text{ВОВ}}$ – в 6-8 раз (Кукушкин и др., 2004; Кукушкин, 2013а). Область с пониженными концентрациями $P_{\text{ВОВ}}$ в центральном и восточном районах по сравнению с зимним периодом заметно уменьшилась по площади, а абсолютная величина его концентрации в среднем увеличилась примерно в 2 раза. Как и в зимний период, распределение $P_{\text{ВОВ}}$ в зоне фотосинтеза хорошо совпадало с его распределением в поверхностном слое, а средневзвешенная его концентрация в этом слое была в 1.3-1.5 раза ниже (табл. 2).

Величины атомарных отношений C/P и C/N в исследуемых слоях в западном районе снижались по сравнению с зимним периодом (табл. 2) и приближались к оптимальному атомарному соотношению (106:16:1), а величины отношения C/N (5.8-5.9) были ниже оптимальной, что, видимо, связано с повышенным содержанием азота в детрите. Высокие величины отношения $C/\text{хл«а»}$ (378-628) в обоих слоях этого района свидетельствуют о высоком содержании детрита в ВОВ. Высокая биомасса фитопланктона (более 1 гСм^{-3}) и ее доля в $C_{\text{ВОВ}}$ – 51% отмечалась на станции, расположенной в 12 милях к западу от входа в Днепро-Бугский лиман. Южнее этой станции (примерно на 20 миль) среднее значение биомассы фитопланктона в трансформированных речных водах соответствовало 43.5 мгСм^{-3} в поверхностном слое и 35 мгСм^{-3} в зоне фотосинтеза и составляло около 5% от содержания $C_{\text{ВОВ}}$, что указывает на высокую долю детрита в ВОВ.

В центральном районе, на западные и северные участки которого в весенний период распространились трансформированные речные воды, биомасса фитопланктона составляла 25.5 и 29.5 мгСм^{-3} , а доля фитопланктона в $C_{\text{ВОВ}}$ – 16 и 26 % в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза соответственно. Величины отношений C/N и C/P весной были ниже по сравнению с зимним периодом. Относительно высокая средняя величина отношения $C/\text{хл«а»}$, равная 313, и отношения C/N – 7.1 в поверхностном слое указывают на малый вклад живого вещества в ВОВ, состоящего в основном из трансформированного детрита. В зоне фотосинтеза, где средняя величина отношения $C/\text{хл«а»}$ снижалась до 191, доля фитопланктона в ВОВ была несколько выше. По сравнению с зимним периодом величины отношения C/P в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза центрального района снижались, но были несколько выше, чем в западном районе, находящемся под постоянным влиянием речного стока.

В летний период повышенные концентрации $P_{\text{ВОВ}}$, как и в весенний период, наблюдались в западном, северном и частично центральном районах (рис. 2д, 2е). По сравнению с весенним периодом содержание $P_{\text{ВОВ}}$ в районе постоянного влияния речного стока снижалось в поверхностном слое в 1.6 раза, а в зоне фотосинтеза – в 1.3 раза (табл. 2). В центральном районе его содержание в поверхностном слое повышалось примерно в 1.5 раза, а в зоне фотосинтеза – в 2.1 раза. Распределение $P_{\text{ВОВ}}$ в этой зоне хорошо совпадало с его распределением в поверхностном слое, а средневзвешенная его концентрация была близка к концентрации в поверхностном слое. В западном районе отмечены высокие средние величины отношения $C/\text{хл«а»}$ в поверхностном

слое – 375 и в зоне фотосинтеза – 229, а также близкая к оптимальной величина отношения C/N , равная 6.5 и 6.0 в этих слоях соответственно, что указывает на достаточно высокое содержание детрита в ВОВ. Это подтверждается и сравнительно небольшим вкладом биомассы фитопланктона в состав ВОВ, который в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза составлял 13 и 22% соответственно. В то же время в годовом цикле абсолютная величина биомассы фитопланктона летом была максимальной и составляла 102 и 145.5 мгСм⁻³ в этих слоях соответственно. В центральном районе в поверхностном слое и зоне фотосинтеза содержание фитопланктона в составе ВОВ было низким (средняя величина отношения $C/хл«а»$ в обоих слоях была равна 553), а доля фитопланктона в $C_{ВОВ}$ составляла всего лишь 9%. В зоне фотосинтеза ВОВ в основном было представлено слабо трансформированным детритом ($C/N = 6.7$).

В осенний период в районе постоянного влияния речного стока (западный и северный районы) содержание $P_{ВОВ}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза по сравнению с летним периодом снизилось более чем в 6 раз и в годовом цикле было минимальным (рис. 2ж, 2з, табл. 2). Относительно низкая средняя величина отношения $C/хл«а»$ (85-100), близкая к оптимальной величина отношения C/N (6.7) и сравнительно высокая концентрация хлорофилла «а» (1.25-1.34 мгм⁻³) в зоне фотосинтеза свидетельствовали о достаточно высоком содержании фитопланктона в составе ВОВ, что подтверждается вкладом фитопланктона в $C_{ВОВ}$, составляющим 39% в поверхностном слое и 60% в зоне фотосинтеза.

В центральном районе содержание $P_{ВОВ}$ по сравнению с летним периодом в поверхностном слое понизилось в 2.4 раза, а в зоне фотосинтеза – в 1.8 раза и было несколько выше, чем в зимний период. В целом распределения $P_{ВОВ}$ в осенний и зимний периоды хорошо совпадали (рис. 2а, 2б, 2ж, 2з). Высокие средние величины отношения $C/хл«а»$ в поверхностном слое (489) и в зоне фотосинтеза (619) и близкие к оптимальной величине отношения ($C/N = 6.8-6.9$) указывают на преобладание в составе ВОВ трансформированного детрита. Величина биомассы фитопланктона в центральном районе в годовом цикле была минимальной (12.5-13.5 мгСм⁻³), как и ее доля в составе ВОВ, равная 8-10%.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали хорошее совпадение сезонных пространственных распределений $P_{ВОВ}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза СЗЧМ. Повышенные концентрации $P_{ВОВ}$ в годовом цикле и максимальные его значения в весенний период отмечались в районе постоянного влияния рек (западный и северный районы СЗЧМ). В центральном районе в этот период были получены низкие величины концентрации $P_{ВОВ}$, поскольку трансформация вод речного стока в основном проходила в границах западного района СЗЧМ. В летне-осенний период распространение трансформированных речных вод, обогащенных биогенными элементами и ВОВ, в центральном районе было связано как с волнами половодья (Большаков, 1970), так и с часто наблюдаемой в СЗЧМ антициклонической циркуляцией водных масс, обусловленной благоприятной ветровой ситуацией (Кукушкин, 2006). Это, с одной стороны, способствовало активному развитию фитопланктона и увеличению его биомассы, а с другой – уве-

личению содержания $P_{\text{ВОВ}}$ и $S_{\text{ВОВ}}$, сопоставимого с их величинами, полученными в районе постоянного влияния речного стока в зимне-весенний период. Характер сезонных пространственных распределений $P_{\text{ВОВ}}$ совпадал с распределениями $S_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а». Из анализа атомарных отношений C/P и C/N и $C/\text{хл}«а»$ следует, что в районах постоянного влияния речного стока, в наибольшей степени подверженных антропогенному влиянию, в весенне-летний период увеличивается не только биомасса фитопланктона, но и содержание детрита, что может быть связано с увеличением объема речного стока и, как следствие, с возрастающим поступлением в СЗЧМ аллохтонного ВОВ.

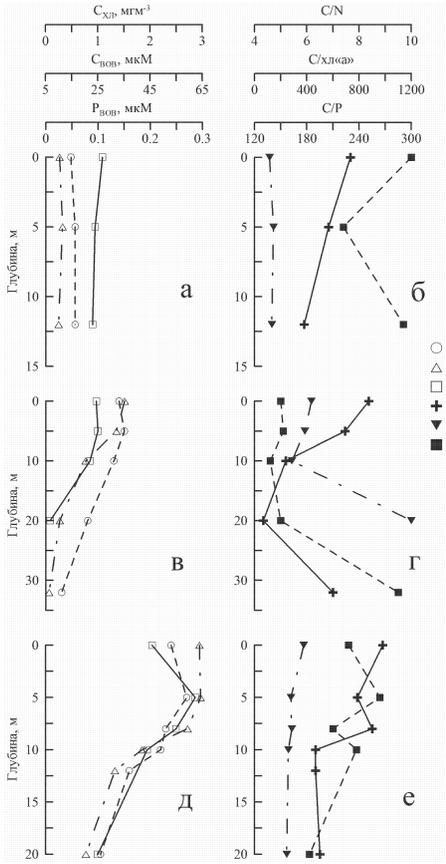


Рисунок 3. Вертикальное распределение концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, мкМ (1), $S_{\text{ВОВ}}$, мкМ (2), $C_{\text{ХЛ}}$, мг/м³ (3) и отношений концентраций C/P (4), $C/\text{хл}«а»$ (5) и C/N (6) в западном районе в декабре 1987 г. (а, б), мае 1994 г. (в, г) и сентябре 1993 г. (д, е)

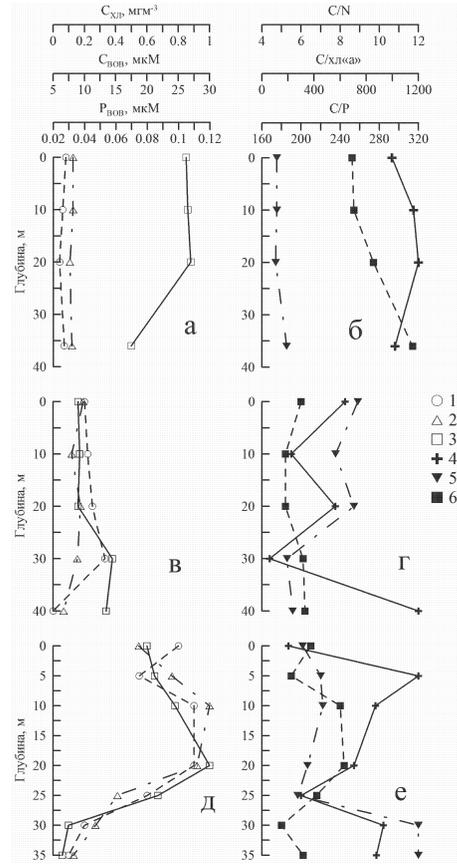


Рисунок 4. Вертикальное распределение концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, мкМ (1), $S_{\text{ВОВ}}$, мкМ (2), $C_{\text{ХЛ}}$, мг/м³ (3) и отношений концентраций C/P (4), $C/\text{хл}«а»$ (5) и C/N (6) в центральном районе в декабре 1987 г. (а, б), апреле 1989 и мае 1994 гг. (в, г), июле 1985 и сентябре 1993 гг. (д, е)

Вертикальное распределение концентрации компонентов ВОВ. Анализ вертикального распределения концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» и их отношений, полученных в декабре 1987 г. в предустьевой зоне Дуная, показал следующее. В исследуемом слое вод с соленостью, равной 15.8-16 рси, распределение компонентов ВОВ было однородное (рис. 3а). Величина отношения C/P уменьшалась с глубиной, но оставалась высокой (177). Отно-

сительно невысокая величина отношения $C/\text{хл}\langle\text{а}\rangle$, равная 114-140, свидетельствует о наличии в ВОВ фитопланктона и детрита. При этом детрит был достаточно трансформирован ($C/N > 9$).

В центральном районе, не подверженном влиянию речного стока, вертикальное распределение показателей ВОВ в зоне фотосинтеза (0-20 м), как и в районе влияния речного стока, было однородное, а их концентрации были несколько ниже (рис. 4а). Также однородным в этом слое было распределение отношения $C/\text{хл}\langle\text{а}\rangle$ (105-115), что указывает на наличие фитопланктона в составе ВОВ. В слое 20-36 м доля фитопланктона в ВОВ уменьшалась, а доля детрита, который был сильно трансформирован ($C/N=9.7-11.7$), возрастала.

Вертикальное распределение содержания компонентов ВОВ и их отношений, полученных в мае 1994 г. в северном районе СЗЧМ, показано на рис. 3б. Весной в связи с прогревом вод их стратификация усиливается. Так, в период наблюдений трансформированные речные воды с соленостью от 12 до 17 psu находились в слое 0-15 м.

Распределение компонентов ВОВ в слое 0-10 м было достаточно однородным. На глубинах ниже 15 м их концентрации заметно уменьшились (особенно $C_{\text{ХЛ}}$). Высокие величины отношения $C/\text{хл}\langle\text{а}\rangle$ (286-435) в слое 0-10 м свидетельствовали о высоком содержании в ВОВ детрите, который был слабо трансформирован ($C/N=4.5-5$). На глубинах ниже 20 м ВОВ был представлен сильно трансформированным детритом. В то же время на станции вблизи входа в Днепро-Бугского лиман в сильно распресненных водах (соленость около 5 psu) в поверхностном слое были измерены высокие значения концентрации хлорофилла «а» (22.5 мг/м³), $C_{\text{ВОВ}}$ (183.2 мкМ) и $P_{\text{ВОВ}}$ (1.1 мкМ). Здесь ВОВ в основном состоял из фитопланктона.

В центральном районе вертикальное распределение концентраций компонентов ВОВ и их отношений, полученных в апреле 1989 и мае 1994 гг. в воде с соленостью более 17.8 psu, представлено на рис 4б. В пределах зоны фотосинтеза (30-40 м) наблюдалось равномерное распределение показателей (кроме резкого уменьшения концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ на горизонте 40 м). В слое 0-20 м в составе ВОВ преобладал детрит, находившийся в слабо трансформированном состоянии ($C/\text{хл}\langle\text{а}\rangle=565-735$; $C/N=5.2-6$). В слое 30-40 м наблюдались повышенные концентрации хлорофилла «а», что отразилось на заметном уменьшении величины отношения $C/\text{хл}\langle\text{а}\rangle$ (192-236). Резкое уменьшение содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в этом слое, видимо, объясняется более быстрым выведением фосфора из детрита (Рудяков и др., 1984).

В летний период основная масса ВОВ была сосредоточена в верхнем распределенном слое над термоклином (0-12 м). Распределение концентраций компонентов ВОВ в этом слое, полученное в прибрежной зоне на участке от Днепро-Бугского лимана до Дуная в начале сентября 1993 г., было примерно одинаковое, а максимум их концентраций наблюдался на глубине 5 м (рис. 3в). Ниже термоклина концентрация всех показателей примерно одинаково уменьшалась. Характер изменения их содержания во всем исследуемом слое (0-20 м) был подобным. Состав ВОВ в слое изменялся незначительно. В ВОВ преобладал детрит ($C/\text{хл}\langle\text{а}\rangle=250-370$), который находился в слабо трансформированном состоянии ($C/N=5.4-7.2$).

В водах центрального района, не подверженных влиянию речного стока, повышенные концентрации компонентов ВОВ были получены в зоне фотосинтеза, а максимальные их значения наблюдались в области термоклина на глубинах 15-20 м (рис 4в). Ниже термоклина их концентрация заметно уменьшалась. Как и в районе влияния речного стока, характер изменения концентраций всех показателей по глубине был примерно одинаковый. В зоне фотосинтеза (0-25 м) в ВОВ преобладал детрит ($C/хл\langle a \rangle = 270-470$), слабо трансформированный в слое 0-5 м и сильно трансформированный в слое над термоклином ($C/N = 8-8.2$).

Внутригодовая изменчивость содержания $R_{ВОВ}$. При исследовании внутригодовой изменчивости биомассы фитопланктона для исключения возможного влияния её межгодовой изменчивости использовали результаты измерений (Black Sea Data..., 2003), совпадающие с измеренными концентрациями $R_{ВОВ}$ и хлорофилла «а» в одни и те же годы и сезоны. В случае их несовпадения использовали данные по биомассе фитопланктона, полученные в те годы и сезоны, когда климатические условия были близки условиям в годы проведения измерений $R_{ВОВ}$ и $C_{ХЛ}$. Сформированный таким образом массив данных по биомассе фитопланктона использовали для оценки внутригодовой ее изменчивости в западной и центральной части СЗЧМ.

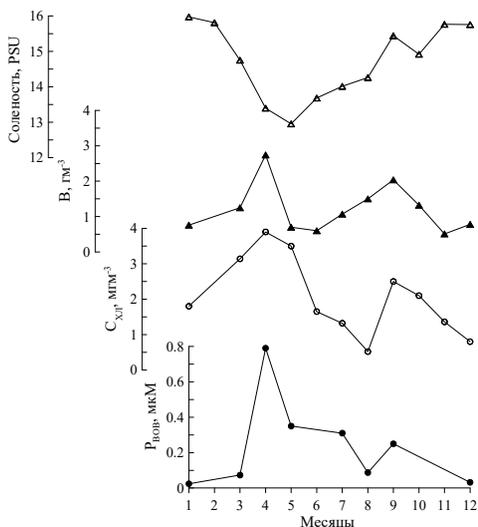


Рисунок 5. Внутригодовое изменение концентраций $R_{ВОВ}$, хлорофилла «а» ($C_{ХЛ}$), биомассы фитопланктона (В) и солености в поверхностном слое в западном районе СЗЧМ

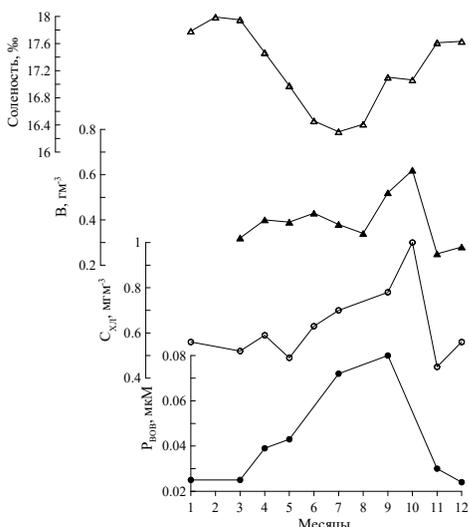


Рисунок 6. Внутригодовое изменение концентраций $R_{ВОВ}$, хлорофилла «а» ($C_{ХЛ}$), биомассы фитопланктона (В) и солености в поверхностном слое в центральном районе СЗЧМ

Анализ сезонной изменчивости содержания $R_{ВОВ}$, хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона в зоне фотосинтеза западной части СЗЧМ показал, что во время половодья в весенний период наблюдалось увеличение абсолютных величин этих показателей с максимумами в апреле и мае (рис. 5). В летний и осенний периоды в целом были отмечены малые величины исследуемых показателей со слабо выраженными пиками $R_{ВОВ}$. В то же время в годовом ходе хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона в весенний и осенний периоды отмечались примерно одинаковые их максимумы. Однако, в работах

(Берсенева, 1993; Маштакова, Роухияйнен, 1979) было показано, что на всей акватории западного и северо-западного шельфа май характеризуется небольшими величинами биомассы фитопланктона. В тоже время концентрация хлорофилла «а» достигала максимальных величин. Можно предположить, что наблюдаемое несоответствие значений этих показателей было обусловлено адаптационным увеличением внутриклеточного содержания хлорофилла «а» в водорослях в связи с ухудшением световых условий для развития водорослей, связанное со снижением прозрачности воды в период весеннего половодья. Отмеченные несовпадения в отдельные месяцы годового хода биомассы фитопланктона и содержания $P_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» в западном и центральном районах СЗЧМ могли быть связаны и с межгодовой изменчивостью этих показателей, которая в значительной степени обусловлена изменениями объемов речного стока и гидрометеорологическими условиями.

В центральном районе, в отличие от западного, внутригодовая изменчивость содержания $P_{\text{ВОВ}}$, хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона имела в целом подобный характер. В зимне-весенний период наблюдались малые величины этих показателей, а в летне-осенний период проявлялись их максимумы (июль – октябрь) (рис. 6). Это, по-видимому, обусловлено распространением на весь центральный район обогащенных биогенными элементами трансформированных речных вод. Очевидно, что увеличение интенсивности и масштаба распространения трансформированных речных вод оказывает существенное влияние на развитие фитопланктона, что, в конечном счете, способствует увеличению его биомассы в центральном районе. Отличие характера внутригодовой изменчивости содержания $P_{\text{ВОВ}}$ хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона в центральном районе по сравнению с западным районом, вероятнее всего, можно объяснить более поздним поступлением трансформированных речных вод, обогащенных биогенными элементами.

Общим и характерным для внутригодовой изменчивости $P_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ВОВ}}$, $C_{\text{ХЛ}}$ и биомассы фитопланктона в западном и центральном районах СЗЧМ являются минимальные их величины и слабое развитие фитопланктона в период с ноября по январь (рис. 5, 6). Характер изменчивости содержания $P_{\text{ВОВ}}$ удовлетворительно согласуется с годовым ходом концентрации хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона, что указывает на важную роль фитопланктона в образовании и изменчивости содержания $P_{\text{ВОВ}}$.

Межгодовая изменчивость содержания $P_{\text{ВОВ}}$. Для анализа такой изменчивости экспериментальные данные содержания $P_{\text{ВОВ}}$ были дополнены его значениями, рассчитанными по данным спутниковых (радиометр CZCS, 1979-1986 гг., сканер цвета Sea WiFS, 1997-2010 гг.) наблюдений концентрации хлорофилла «а». Различие измеренных и рассчитанных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ в зимний период в среднем не превышало 10%, а весенне-осенний период оно находилось в пределах 10-25%.

Известно, что в западном районе на распределение содержания $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» в зимне-весенний период оказывают влияние региональные гидрометеорологические условия и объемы стока рек, изменения которых, в свою очередь, обусловлены изменчивостью крупномасштабных

процессов в системе океан-атмосфера (Воскресенская и др., 2004, 2011; Кукушкин, 2013а). Механизм такого влияния заключается в том, что в годы Эль-Ниньо в зимний период ослабляется циклоническая активность над Центральной и Южной Европой. Устойчивая антициклональная погода, характеризующаяся небольшими осадками и низкими значениями температуры воздуха, приводит к снижению объема стока рек и уменьшению площади зоны их влияния в СЗЧМ в зимний период. В период весеннего половодья влияние речного стока на водные массы СЗЧМ возрастает. В зоне смешивания речных и морских вод активно развивается фитопланктон, интенсивность развития которого зависит от количества поступающих минеральных соединений азота и фосфора, температуры воды и освещенности. В период нормальных зим (отсутствие Эль-Ниньо) отмечается активизация циклонической активности над центральной и южной частями Европы. Это способствует увеличению осадков над площадями водосборов рек, что приводит к повышению объема речного стока и расширению зоны его влияния на воды СЗЧМ. В зоне трансформации этих вод в связи с дополнительным поступлением биогенных элементов и аллохтонного взвешенного вещества активно развивается фитопланктон и растет содержание ВОВ.

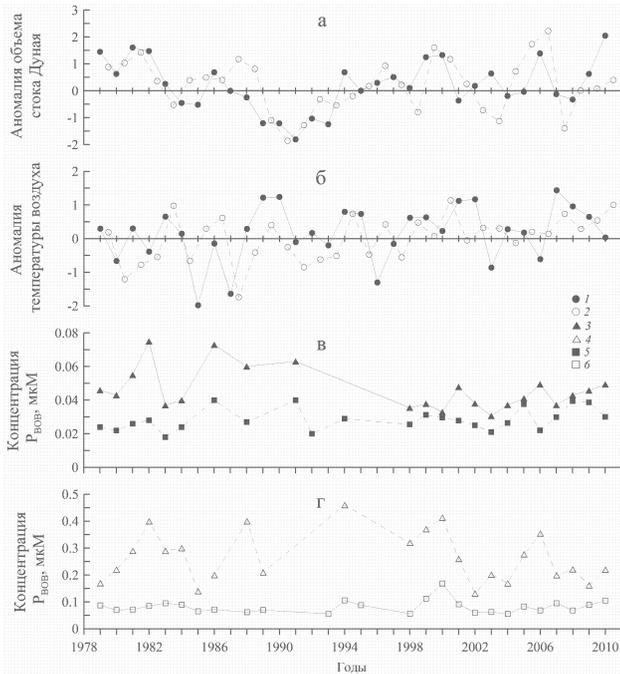


Рисунок 7. Межгодовые изменения средних значений аномалий объема стока Дуная (а), температуры воздуха (б) и концентрации Р_{ВОВ} (в, г) в зимний (1, 3, 5) и весенний (2, 4, 6) периоды в западном (3, 4) и центральном (5, 6) районах СЗЧМ

Для оценки межгодовых изменений содержания Р_{ВОВ} в зимне-весенний период были использованы значения аномалий объемов стока Дуная и температуры воздуха (рис. 7) (Воскресенская и др., 2004, 2011; Гидрометеорологические условия..., 2012). Из анализа этих данных следует, что умеренно тёплые зимы

(кроме зимы 1980 г.) и относительно высокие объемы стока Дуная в течение 1979-1982 гг. способствовали интенсивному развитию фитопланктона в районе влияния рек. Концентрация хлорофилла «а» в эти годы была выше средней (Кукушкин, 2013а) и отмечалось увеличение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ (рис. 7г). В центральном районе СЗЧМ, который в этот период не был подвержен влиянию речного стока, также наблюдалось увеличение концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ (рис. 7г). Весной после 1983 г. его концентрация снижалась и минимальное значение было получено в 1985 г. (после холодной зимы) и в 1989 г. при низком объеме стока Дуная.

В период 1991-1995 гг., характеризуемый долгоживущим событием Эль-Ниньо – Южное колебание с несколькими фазами развития и затухания, выделялись холодные зимы 1992 и 1993 гг. с малым объемом стока Дуная. Проведенные зимой 1992 г. измерения только в центральном районе показали низкие концентрации хлорофилла «а» и $P_{\text{ВОВ}}$. Весной 1993 г. концентрации этих показателей повысились, но были ниже средних многолетних их значений. Умеренно теплые зимы 1994 и 1995 гг. и близкие к средним значениям объема стока Дуная способствовали более интенсивному весеннему развитию фитопланктона и заметному повышению содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в СЗЧМ по сравнению с предшествующими годами (Воскресенская и др., 2011).

В летне-осенний период были выделены два временных интервала (1979-1985, 1987-1992 гг.) с различным характером межгодовой изменчивости концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» (Кукушкин, 2013б). В летний период в 1979-1985 гг. концентрации в обоих районах уменьшались и характер их изменения (особенно в центральном районе) хорошо согласовывался с изменениями средней температуры в летний период (Гидрометеорологические условия..., 2012). Значительное снижение концентраций наблюдалось холодным летом 1985 г. В осенний период причиной высоких концентраций могло быть интенсивное развитие фитопланктона в связи с поступлением в центральный район трансформированных речных вод, обогащенных биогенными элементами (Кукушкин и др., 2008). Во втором временном интервале отмечалось повышение концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» в обоих районах СЗЧМ. Вероятнее всего, высокие концентрации в летнее время в период с 1989 по 1992 гг. были обусловлены поступлением в центральный район биогенных элементов с трансформированными речными водами, распространявшимися на шельфе благодаря антициклонической циркуляции водных масс (Кукушкин и др., 2006). Относительно высокие концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ и хлорофилла «а» наблюдались и в западном районе в период аномально теплого лета 1992 г. после холодной зимы. В 1993 г. лето было умеренно холодным и их концентрации в районе уменьшились.

В последние 20 лет в западной и северо-западной частях черноморского региона произошли климатические изменения (Матыгин и др., 2013), видимо, связанные с глобальным потеплением. Температура воздуха зимой в течение этого периода повышалась, а количество холодных зим уменьшилось. В теплый период года увеличилась повторяемость теплых летних месяцев и практически не отмечались холодные. До середины 1990-х годов тренды зимних и летних температур находились в противофазе (после холодной зимы наступало теплое лето и наоборот). В последние годы лето после теплой зимы, как правило,

также было теплым. Кроме того, было отмечено изменение ветровых условий, не способствовавшее поступлению трансформированных речных вод в центральный район шельфа. Такие климатические изменения вызвали изменения в структуре и развитии фитопланктонного сообщества (увеличилось его видовое разнообразие и численность, изменились фазы развития).

Межгодовые изменения содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в западном районе в зимне-весенний период в 1998-2010 гг. в основном определялись объемом стока Дуная и температурой воздуха. Повышенное его содержание было получено зимой (2006, 2009, 2010 гг.) и весной (1999, 2000 и 2006 гг.) при повышенном объеме стока Дуная (рис. 7). При этом зимы в эти годы были умеренно теплыми. В то же время зимой в 2001 г. повышенная концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ отмечалась при невысоком стоке Дуная и высокой температуре воздуха. Пониженное его содержание зимой в 2000 и 2003 гг. было получено при относительно высоком объеме речного стока и относительно низкой температуре воздуха.

В центральном районе в зимний период концентрация $P_{\text{ВОВ}}$ в основном зависела от температуры воздуха. Так, повышенное его содержание в 2005, 2008 и 2009 гг. и пониженное содержание в 2003 и 2006 гг. были отмечены при повышенной и пониженной (относительно климатической нормы) температуре воздуха (рис. 7). В весенний период на изменения концентрации $P_{\text{ВОВ}}$ помимо температуры воздуха также влияли изменения объема речного стока. Повышенное его содержание в 1999, 2009 и 2010 гг. было получено при повышенной температуре воздуха и высоком стоке Дуная, пониженное содержание в 1998, 2002-2004 гг. отмечалось при близкой к климатической температуре воздуха и сравнительно низком объеме стока Дуная.

В летний период межгодовые изменения содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в 1998-2010 гг. в меньшей степени по сравнению с зимне-осенним периодом зависели от изменения температуры воздуха, которая в течение этого временного интервала монотонно повышалась. В западном районе эти изменения в большей степени были обусловлены объемом речного стока. В центральном районе повышенные концентрации в 2000 и 2005 гг. были получены при повышенных значениях температуры воздуха и объема стока Дуная. Пониженные концентрации в отдельные годы (2001, 2007) отмечались при сравнительно невысоких значениях объема речного стока и высокой температуре воздуха. В 2003, 2006 и 2010 гг. объем речного стока и температура воздуха были высокими.

Заключение

В результате проведенных исследований выявлены основные особенности пространственного и вертикального распределения содержания $P_{\text{ВОВ}}$, внутригодовой и межгодовой его изменчивости в различные сезоны в разных районах СЗЧМ. Установлено, что характер сезонных пространственных распределений содержания $P_{\text{ВОВ}}$ в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза в западном и центральном районах СЗЧМ, различающихся по степени влияния стока рек и вод открытого моря, совпадал с распределениями $S_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $S_{\text{ХЛ}}$. Статистические оценки сезонных изменений одновременно измеренных концентраций $P_{\text{ВОВ}}$, $S_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$, хлоро-

филла «а» и их отношений в исследуемых слоях различных районов СЗЧМ позволили оценить вклад фитопланктона и детрита в составе ВОВ.

Внутригодовая изменчивость $P_{\text{ВОВ}}$ для западного района СЗЧМ характеризовалась максимальными величинами его содержания в весенний период. В центральном районе увеличение концентраций $P_{\text{ВОВ}}$ наблюдалось в летне-осенний период, когда в район поступали речные воды, обогащенные биогенными элементами. В период с ноября по январь отмечались минимальные величины содержания $P_{\text{ВОВ}}$, хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона в СЗЧМ, что указывало на слабое развитие фитопланктона.

В зимне-весенний период межгодовые изменения $P_{\text{ВОВ}}$ в западном районе в основном были связаны с объемом речного стока и температурой воздуха (суровостью зим), а в центральном районе – температурой воздуха. В летне-осенний период такие изменения в этих районах зависели от температуры воздуха (в период наблюдений и в предшествующие периоды). В центральном районе на межгодовую изменчивость $P_{\text{ВОВ}}$ также заметное влияние оказывало поступление в район трансформированных речных вод и масштаб их распространения, зависящий от характера циркуляции вод в СЗЧМ.

Список литературы

Берсенева Г.П. 1993. Сезонная динамика концентрации хлорофилла «а». – В кн.: Планктон Черного моря. – Киев, Наукова думка, с. 92-102.

Берлинский Н.А., Богатова Ю.И., Гаркавая Г.Н. 2003. Проблемы антропогенного эвтрофирования и развития гипоксии в северо-западной части Черного моря. – Экология моря, т. 63, с. 17-52.

Большаков В.С. 1970. Трансформация речных вод в Черном море. – Киев, Наукова думка, 328 с.

Бордовский О.К., Якушев Е.В. 1995. Моделирование вертикального распределения взвешенных форм органического углерода, азота и фосфора в юго-западной части Тихого океана. – Океанология, т. 35, № 6, с. 890-894.

Бурлакова З.П., Еремеева Л.В., Крупаткина Д.К., Чистенко В.М. 1988. Распределение и элементный состав взвешенного вещества в западной и северо-западной частях Черного моря. – В кн.: Процессы формирования и внутригодовой изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей Черного моря. – Севастополь, МГИ АН УССР, с. 162-172.

Бурлакова З. П., Еремеева Л. В., Коновалов С. К. 1998. Сезонная и пространственная изменчивость содержания взвешенного органического вещества в деятельном слое Черного моря. – Морской гидрофизический журнал, № 5, с. 30-62.

Востоков С. В. 1987. Живое и неживое вещество органической взвеси прибрежных вод Болгарии и прилегающих районов моря. – В кн.: Современное состояние экосистемы Черного моря. – М., Наука, с. 68-77.

Востоков С. В. 1996. Взвешенное вещество как показатель продуктивности в западной части Черного моря. – Океанология, т. 36, № 2, с. 260-267.

Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. 2004. О связи крупномасштабных атмосферных процессов с изменчивостью прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод северо-западной части Черного моря в зимний период. – Метеорология и гидрология, № 12, с. 52-62.

Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С., Михайлова Н.В., 2011. Особенности изменчивости распределений прозрачности и содержания взвешенного вещества в северо-западной части Черного моря в весенний период в связи с крупномасштабными процессами в системе океан – атмосфера. – Метеорология и гидрология, № 1, с. 64-77.

Гаркавая Г.Н., Богатова Ю.И. 2006. Гидрохимические исследования: источники эвтрофирования. – В кн.: Северо-западная часть Черного моря: биология и экология. – Киев, Наукова думка, с. 60-74.

Гидрометеорологические условия морей Украины, т. 2, Черное море. 2012. – Севастополь, УкрНИГМИ, 421 с.

Кривенко О.В., Пархоменко А.В. 2010. Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948-2001 гг. – Морской экологический журнал, т. 9, № 4, с. 5-24.

Кукушкин А.С., Агафонов Е.А., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. 2004. Изменчивость прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое северо-западной части Черного моря. – Океанология, т. 44, № 6, с. 870-881.

Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. 2006. Изменчивость распределения прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод северо-западной части Черного моря в летний период. – Океанология, т. 46, № 6, с. 834-845.

Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. 2008. Особенности распределения прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое северо-западной части Черного моря в осенний период. – Океанология, т. 48, № 3, с. 333-344.

Кукушкин А.С. 2013а. Изменчивость содержания взвешенного органического вещества в северо-западной части Черного моря. – Океанология, т. 53, № 5, с. 626-642.

Кукушкин А.С. 2013б. Пространственно-временная изменчивость содержания взвешенного органического фосфора в верхнем слое западной глубоководной и северо-западной шельфовой частях Черного моря. – Морской экологический журнал, т. 6, № 4, с. 62-71.

Кукушкин А.С., Пархоменко А.В. 2015. Изменчивость содержания взвешенного органического фосфора в верхнем слое глубоководной области Черного моря. – Океанология, т. 55, № 2, с. 252-261.

Люцарев С.В., Миркина С.Д. 1978. Определение общего фосфора во взвешенном веществе. – В кн.: Методы гидрохимических исследований океана. – М., Наука, с. 175-179.

Матыгин А.С., Сытов В.Н., Попов Ю.И., Ковалишина С.П., 2013. Изменчивость климатических характеристик морских вод в северо-западной части Черного моря. – В кн.: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, вып. 12. – Севастополь, ЭКОСИ Гидрофизика, с. 97-105.

Маштакова Г.П., Роухияйнен М.И. 1979. Сезонная динамика фитопланктона. – В кн.: Основы биологической продуктивности Черного моря. – Киев, Наукова думка, с. 85-88.

Пархоменко А.В., Ковальчук Ю.Л. 1993. Исследование гидрохимического режима филофорного поля Зернова в летний период. – Экология моря, т. 43, с. 69-75.

Романкевич Е.А. 1977. Геохимия органического вещества в океане. – М., Наука, 1977, 256 с.

Румшинский Л.З. 1970. Элементы теории вероятности. – М., Наука, 1970, 256 с.

Рудяков Ю.А., Сапожников В.В., Агатова А.И. 1984. Изменения пищевой ценности разлагающегося планктона и некоторые особенности процесса регенерации азота и фосфора – В кн.: Фронтальные зоны юго-восточной части Тихого океана: (Биология, физика, химия). – М., Наука, с. 92-100.

Black Sea Data base supplied with Ocean Base 3.07 DBMS. 2003. – NANO SfP-971818 ODBMS Black Sea Project, CD-ROM.

Blackseacolor. – Available at: <http://blackseacolor.com> (accessed 10.11.2016).

Copin-Montegut C., Copin-Montegut G. 1983. Stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in marine particulate matter. – Deep-Sea Res, vol. 30, No. 1, pp. 31-46.

Hobson Z.A., Menzel D.W., Barber R.T. 1973. Primary productivity and sizes of pools of organic carbon in the mixed layer of the ocean. – J. Marine Biology, vol. 19, No. 4, pp. 298-306.

References

Berseneva g.p. 1993. Sezonnaia dinamika kontsentratsii khlorofilla «a» [Seasonal dynamics of "a" chlorophyll concentration]. *Plankton chernogo moria* [Plankton of the Black Sea]. Kiev, Naukova Dumka, pp. 92-102.

Berlinskii N.A., Bogatova Iu.I., Garkavaia G.N. 2003. Problemy antropogennogo evtrofirovaniia i razvitia gipoksii v severo-zapadnoi chasti Chernogo moria [Problems of anthropogenic eutrophication and development of hypoxia in the northwestern part of the Black Sea]. *Ekologiya moria – Ecology of the sea*, vol. 63, pp. 17-52.

Bol'shakov V.S. 1970. *Transformatsiia rechnykh vod v Chernom more* [Transformation of river waters in the Black Sea]. Kiev, Naukova Dumka, 328 p.

Bordovskii O.K., Iakushev E.V. 1995. Modelirovanie vertikal'nogo raspredeleniia vzveshennykh form organicheskogo ugleroda, azota i fosfora v iugo-zapadnoi chasti

Tikhogo okeana [Modeling of the vertical distribution of suspended forms of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the southwestern part of the Pacific Ocean]. *Okeanologiya – Oceanology*, vol. 35, no. 6, pp. 890-894.

Burlakova Z.P., Ereemeeva L.V., Krupatkina D.K., Chistenko V.M. 1988. Raspredelenie i elementnyi sostav vzveshennogo veshchestva v zapadnoi i severo-zapadnoi chastiakh Chernogo moria [Distribution and elemental composition of suspended matter in the western and northwestern parts of the Black Sea]. *Protsessy formirovaniia i vnutrigodovoi izmenchivosti gidrofizicheskikh i gidrokhimicheskikh polei Chernogo moria* [Processes of formation and intra-annual variability of hydrophysical and hydrochemical fields of the Black Sea]. Sevastopol, MGI Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, pp. 162-172.

Burlakova Z. P., Ereemeeva L. V., Konovalov S. K. 1998. Sezonnaia i prostranstvennaia izmenchivost' sodержaniia vzveshennogo organicheskogo veshchestva v deiatel'nom sloe Chernogo moria [Seasonal and spatial variability of the content of suspended organic matter in the active layer of the Black Sea]. *Morskoj gidrofizicheskii zhurnal – Marine Hydrophysical Journal*, no. 5, pp. 30-62.

Vostokov S. V. 1987. Zhivoe i nezivoe veshchestvo organicheskoi vzvesi pribrezhnykh vod Bolgarii i prilegaiushchikh raionov moria [Alive and inanimate matter of organic suspension of coastal waters of Bulgaria and adjacent areas of the sea]. *Sovremennoe sostoianie ekosistemy Chernogo moria* [Current state of the ecosystem of the Black Sea]. Moscow, Science, pp. 68-77.

Vostokov S. V. 1996. Vzveshennoe veshchestvo kak pokazatel' produktivnosti v zapadnoi chasti Chernogo moria [Suspended matter as an indicator of productivity in the western part of the Black Sea]. *Okeanologiya – Oceanology*, vol. 36, no. 2, pp. 260-267.

Voskresenskaia E.N., Kukushkin A.S., Burlakova Z.P., Ereemeeva L.V. 2004. O sviazi krupnomasshtabnykh atmosferykh protsessov s izmenchivost'iu prozrachnosti i sodержaniia vzveshennogo veshchestva v poverkhnostnom sloe vod severo-zapadnoi chasti Chernogo moria v zimnii period [On the connection of large-scale atmospheric processes with the variability of transparency and the content of suspended matter in the surface layer of the waters of the northwestern part of the Black Sea in winter]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and Hydrology*, no. 12, pp. 52-62.

Voskresenskaia E.N., Kukushkin A.S., Mikhailova N.V., 2011. Osobennosti izmenchivosti raspredelenii prozrachnosti i sodержaniia vzveshennogo veshchestva v severo-zapadnoi chasti Chernogo moria v vesennii period v sviazi s krupnomasshtabnymi protsessami v sisteme okean – atmosfera [Features of the variability in the distributions of transparency and suspended matter in the northwestern part of the Black Sea in the spring in connection with large-scale processes in the ocean-atmosphere system]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and hydrology*, no. 1, pp. 64-77.

Garkavaia G.N., Bogatova Iu.I. 2006. Gidrokhimicheskie issledovaniia: istochniki evtrofirovaniia [Hydrochemical research: sources of eutrophication]. *Severo-zapadnaia chast' Chernogo moria: biologiya i ekologiya* [North-western part of the Black Sea: biology and ecology]. Kiev, Naukova Dumka, pp. 60-74.

Gidrometeorologicheskie usloviia morei Ukrainy, vol. 2, Chernoe more [Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine, vol. 2, Black Sea]. 2012. Sevastopol, Marine Department of the Ukrainian Scientific Research Hydrometeorological Institute, 421 p.

Krivenko O.V., Parkhomenko A.V. 2010. Prostranstvennaia i vremennaia izmenchivost' biomassy fitoplanktona v Chernom more za period 1948-2001 gg [Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass in the Black Sea for the period 1948-2001]. *Morskoi ekologicheskii zhurnal – Marine Ecological Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 5-24.

Kukushkin A.S., Agafonov E.A., Burlakova Z.P., Ereemeeva L.V. 2004. Izmenchivost' prozrachnosti i sodержaniia vzveshennogo veshchestva v poverkhnostnom sloe severo-zapadnoi chasti Chernogo moria [Variability of transparency and content of suspended matter in the surface layer of the northwestern part of the Black Sea]. *Okeanologiya – Oceanology*, vol. 44, no. 6, pp. 870-881.

Kukushkin A.S., Burlakova Z.P., Ereemeeva L.V. 2006. Izmenchivost' raspredeleniia prozrachnosti i sodержaniia vzveshennogo veshchestva v poverkhnostnom sloe vod severo-zapadnoi chasti Chernogo moria v letnii period [Variability of the distribution of the transparency and the content of suspended matter in the surface layer of the waters of the northwestern part of the Black Sea in summer]. *Okeanologiya – Oceanology*, vol. 46, no. 6, pp. 834-845.

Kukushkin A.S., Burlakova Z.P., Ereemeeva L.V. 2008. Osobennosti raspredeleniia prozrachnosti i sodержaniia vzveshennogo veshchestva v poverkhnostnom sloe severo-zapadnoi chasti Chernogo moria v osennii period [Peculiarities of the distribution of the transparency and the content of suspended matter in the surface layer of the northwestern part of the Black Sea in the autumn period]. *Okeanologiya – Oceanology*, vol. 48, no. 3, pp. 333-344.

Kukushkin A.S. 2013a. Izmenchivost' sodержaniia vzveshennogo organicheskogo veshchestva v severo-zapadnoi chasti Chernogo moria [Variability of the content of suspended organic matter in the northwestern part of the Black Sea]. *Okeanologiya – Oceanology*, vol. 53, no. 5, pp. 626-642.

Kukushkin A.S. 2013b. Prostranstvenno-vremennaia izmenchivost' sodержaniia vzveshennogo organicheskogo fosfora v verkhnem sloe zapadnoi glubokovodnoi i severo-zapadnoi shel'fovoi chastiakh Chernogo moria [Spatio-temporal variability of the content of suspended organic phosphorus in the upper layer of the western deep-water and northwestern shelf parts of the Black Sea]. *Morskoi ekologicheskii zhurnal – Marine Ecological Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 62-71.

Kukushkin A.S., Parkhomenko A.V. 2015. Izmenchivost' sodержaniia vzveshennogo organicheskogo fosfora v verkhnem sloe glubokovodnoi oblasti Chernogo moria [Variability of the content of suspended organic phosphorus in the upper layer of the deepwater region of the Black Sea]. *Okeanologiya – Oceanology*, vol. 55, no. 2, pp. 252-261.

Liutsarev S.V., Mirkina S.D. 1978. Opredelenie obshchego fosfora vo vzveshennom veshchestve [Determination of total phosphorus in suspended matter]. *Metody gidrokhimicheskikh issledovaniy okeana* [Methods of Hydrochemical Studies of the Ocean]. Moscow, Science, pp. 175-179.

Matygin A.S., Sytov V.N., Popov Iu.I., Kovalishina S.P., 2013. Izmenchivost' klimaticheskikh kharakteristik morskikh vod v severo-zapadnoi chasti Chernogo moria [Variability of climatic characteristics of sea waters in the northwestern part of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological Safety of the Coastal and Offshore Zones and the Comprehensive Use of the Resources of the Shelf], issue 12, Sevastopol, Ecosi Hydrophysics, pp. 97-105.

Mashtakova G.P., Roukhiainen M.I. 1979. Sezonnaia dinamika fitoplanktona [Seasonal dynamics of phytoplankton]. *Osnovy biologicheskoi produktivnosti Chernogo moria* [Principles of Biological Productivity of the Black Sea]. Kiev, Naukova Dumka, pp. 85-88.

Parkhomenko A.V., Koval'chuk Iu.L. 1993. Issledovanie gidrokhimicheskogo rezhima fillofornogo polia Zernova v letnii period [Study of the hydrochemical regime of the Zernov phyllophora field in the summer]. *Ekologiya moria – Ecology of the sea*, vol. 43, pp. 69-75.

Romankevich E.A. 1977. *Geokhimiya organicheskogo veshchestva v okeane* [Geochemistry of organic matter in the ocean]. Moscow, Science, 1977, 256 p.

Rumshinskii L.Z. 1970. *Elementy teorii veroiatnosti* [Elements of probability theory]. Moscow, Science, 1970, 256 p.

Rudiakov Iu.A., Sapozhnikov V.V., Agatova A.I. 1984. Izmeneniia pishchevoi tsennosti razlagaiushchegosia planktona i nekotorye osobennosti protsessa regeneratsii azota i fosfora [Changes in nutritional value of decomposing plankton and some features of the process of nitrogen and phosphorus regeneration]. *Frontal'nye zony iugo-vostochnoi chasti Tikhogo okeana: (Biologiya, fizika, khimiya)* [Front zones of the southeastern Pacific: (Biology, physics, chemistry)]. Moscow, Science, p. 92-100.

Black Sea Data base supplied with Ocean Base 3.07 DBMS. 2003. – NANO SFP-971818 ODBMS Black Sea Project, CD-ROM.

Blackseacolor. – Available at: <http://blackseacolor.com> (accessed 10.11.2016).

Copin-Montegut C., Copin-Montegut G. 1983. Stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in marine particulate matter. – *Deep-Sea Res*, vol. 30, No. 1, pp. 31-46.

Hobson Z.A., Menzel D.W., Barber R.T. 1973. Primary productivity and sizes of pools of organic carbon in the mixed layer of the ocean. – *J. Marine Biology*, vol. 19, No. 4, p. 298-306.

Статья поступила в редакцию: 29.03.2017

После переработки: 24.04.2017